

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего
образования
«ИРКУТСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ»**

Структурное подразделение «Металлургии цветных металлов (129)»

УТВЕРЖДЕНА:
на заседании кафедры
Протокол №09 от 09 февраля 2026 г.

Рабочая программа дисциплины

«НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В МЕТАЛЛУРГИИ КРЕМНИЯ»

Направление: 22.04.02 Metallургия

Совершенствование и оптимизация технологических процессов производства цветных металлов

Квалификация: Магистр

Форма обучения: очная

Документ подписан простой электронной подписью
Составитель программы: Тютрин Андрей Александрович
Дата подписания: 04.05.2026

Документ подписан простой электронной подписью
Утвердил и согласовал: Немчинова Нина Владимировна
Дата подписания: 08.05.2026

Год набора – 2026

Иркутск, 2026 г.

1 Перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы

1.1 Дисциплина «Новые направления в металлургии кремния» обеспечивает формирование следующих компетенций с учётом индикаторов их достижения

Код, наименование компетенции	Код индикатора компетенции
ПК-4 Способен разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов и оборудования в области получения металлов и сплавов	ПК-4.3
ПК-8 Способен применять принципы рационального природопользования для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии	ПК-8.3

1.2 В результате освоения дисциплины у обучающихся должны быть сформированы

Код индикатора	Содержание индикатора	Результат обучения
ПК-4.3	Демонстрирует способность разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния или тяжелых цветных металлов	Знать основные параметры, оказывающие влияние на эффективность технологических процессов производства кремния, и диапазоны их оптимальных значений; основные причины нарушений работы технологических процессов получения кремния; способы регулирования работы процессов получения кремния и способы их совершенствования Уметь анализировать работу процессов производства кремния и выявлять нарушения, приводящие к снижению технико-экономических показателей Владеть выбирать и обосновывать оптимальные значения технологических параметров процессов получения кремния
ПК-8.3	Применяет принципы рационального природопользования для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния и (или) тяжелых цветных металлов	Знать принципы рационального природопользования в области металлургии кремния Уметь применять принципы рационального природопользования для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния Владеть навыками использования принципов рационального природопользования для энерго- и

	ресурсосбережения
--	-------------------

2 Место дисциплины в структуре ООП

Изучение дисциплины «Новые направления в металлургии кремния» базируется на результатах освоения следующих дисциплин/практик: «Современные проблемы металлургии», «Производственная практика: технологическая (проектно-технологическая) практика», «Анализ технологического цикла получения цветных металлов», «Аналитические методы оценки свойств минерального сырья, металлов и сплавов»

Дисциплина является предшествующей для дисциплин/практик: «Производственная практика: преддипломная практика», «Переработка отходов металлургического производства», «Основы экологически чистого производства»

3 Объем дисциплины

Объем дисциплины составляет – 4 ЗЕТ

Вид учебной работы	Трудоемкость в академических часах (Один академический час соответствует 45 минутам астрономического часа)	
	Всего	Семестр № 3
Общая трудоемкость дисциплины	144	144
Аудиторные занятия, в том числе:	39	39
лекции	26	26
лабораторные работы	0	0
практические/семинарские занятия	13	13
Самостоятельная работа (в т.ч. курсовое проектирование)	69	69
Трудоемкость промежуточной аттестации	36	36
Вид промежуточной аттестации (итогового контроля по дисциплине)	Экзамен	Экзамен

4 Структура и содержание дисциплины

4.1 Сводные данные по содержанию дисциплины

Семестр № 3

№ п/п	Наименование раздела и темы дисциплины	Виды контактной работы						СРС		Форма текущего контроля
		Лекции		ЛР		ПЗ(СЕМ)		№	Кол. Час.	
		№	Кол. Час.	№	Кол. Час.	№	Кол. Час.			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	Современное состояние и перспективы развития металлургии кремния	1, 2, 3, 4, 5	10					1	25	Реферат
2	Моделирование карботермического процесса получения	6, 7	4			1	5	2, 3	18	Устный опрос

	кремния									
3	Рециклинг отходов кремниевого производства	8, 9, 10	6							
4	Повышение качества металлургического кремния	11, 12, 13	6			2, 3	8	2, 3	26	Устный опрос
	Промежуточная аттестация								36	Экзамен
	Всего		26				13		105	

4.2 Краткое содержание разделов и тем занятий

Семестр № 3

№	Тема	Краткое содержание
1	Современное состояние и перспективы развития металлургии кремния	Состояние отрасли производства кремния в настоящее время. Предприятия-производители кремния. Технологический процесс получения кремния в руднотермической печи. Сырье для получения кремния. Печи для выплавки кремния. Температурные зоны РТП. Продукты карботермической плавки.
2	Моделирование карботермического процесса получения кремния	Применение методов термодинамического моделирования при исследовании высокотемпературных металлургических процессов. Структура и характеристика программного комплекса «Селектор». Метод констант равновесия и минимизация. Базовая структура модели динамической мегасистемы, алгоритмы имитации технологического процесса. Компьютерные (физико-химические) модели процесса выплавки технического кремния. Влияние изменения температуры на формирование примесных включений в кремнии на основе семирезервуарной физико-химической модели.
3	Рециклинг отходов кремниевого производства	Расширение сырьевой базы для производства кремния. Побочные продукты производства металлургического кремния. Формирование пылевых материалов при производстве кремния. Окомкование шихты с использованием мелкофракционных сырьевых материалов. Переработка шлаков кремниевого производства. Металлургические испытания окомкованной шихты. Физико-химическое моделирование карботермического процесса получения кремния с использованием окомкованной шихты.
4	Повышение качества металлургического кремния	Окислительное рафинирование кремния. Механизм формирования примесных включений при кристаллизации кремниевого расплава. Рафинированный технический кремний. Кислотно-ультразвуковое рафинирование

		кремния. Термодинамика процесса кислотной очистки порошка кремния. Интенсификация процессов выщелачивания в ультразвуковом поле. Выращивание методами направленной кристаллизации и зонной плавки мультикристаллического кремния. Направленная кристаллизация как эффективный метод очистки кремния. Коэффициент сегрегации. Рафинированный технический кремний как исходный материал для выращивания мультикристаллов. Установка и методика выращивания мультикристаллов кремния. Явления испарения и сублимации. Характеристика и примесный состав образцов мультикремния. Получение мультикристаллического кремния из металлургического сырья зонной плавкой (по методу Багдасарова).
--	--	--

4.3 Перечень лабораторных работ

Лабораторных работ не предусмотрено

4.4 Перечень практических занятий

Семестр № 3

№	Темы практических (семинарских) занятий	Кол-во академических часов
1	Перерасчёт состава шихтовых материалов при введении в модель руднотермической плавки	5
2	Материальный баланс рафинирования кремния	4
3	Определение фазового состава примесных включений по данным рентгеноспектрального микроанализа	4

4.5 Самостоятельная работа

Семестр № 3

№	Вид СРС	Кол-во академических часов
1	Написание реферата	25
2	Подготовка к практическим занятиям	8
3	Проработка разделов теоретического материала	36

В ходе проведения занятий по дисциплине используются следующие интерактивные методы обучения: групповая дискуссия

5 Перечень учебно-методического обеспечения дисциплины

5.1 Методические указания для обучающихся по освоению дисциплины

5.1.1 Методические указания для обучающихся по практическим занятиям

Новые направления в металлургии кремния: метод. указания по выполнению практических работ / сост. : А.А. Тютрин, Н.В. Немчинова. – Иркутск : Изд-во ИРНИТУ, 2018. – 91 с.

5.1.2 Методические указания для обучающихся по самостоятельной работе:

Новые направления в металлургии кремния: метод. указания для самостоятельной работы студентов / сост. Н.В. Немчинова, В.С. Хейфец, М.С. Леонова. - 2016. - 16 с

6 Фонд оценочных средств для контроля текущей успеваемости и проведения промежуточной аттестации по дисциплине

6.1 Оценочные средства для проведения текущего контроля

6.1.1 семестр 3 | Устный опрос

Описание процедуры.

После проработки отдельных разделов теоретического курса обучающийся отвечает на контрольные вопросы.

По теме «Моделирование карботермического процесса получения кремния»

1. Для чего используется метод термодинамического моделирования в металлургии?
2. Алгоритм формирования пятирезервуарной термодинамической модели для получения кремния при использовании окомкованной шихты?
3. В каком резервуаре термодинамической пятирезервуарной модели происходят основные физико-химические превращения?
4. Какими показателями может быть охарактеризована сформированная пятирезервуарная термодинамическая модель?
5. Каковы преимущества программного комплекса «Селектор»?
6. В чем отличие пятирезервуарной модели от ранее созданных четырех-, семи-, восьмirezервуарных моделей?

По теме «Повышение качества металлургического кремния».

1. Какие виды материалов на основе кремния используются для изготовления ФЭП?
2. Какие примесные элементы в кремнии оказывают наибольшее влияние на КПД ФЭП?
3. Какие преимущества имеет метод получения чистого кремния восстановлением тетрахлорида кремния водородом перед цинкотермическим?
4. Какие методы применяются для получения моносилана?
5. Какая реакция лежит в основе йодидного метода получения кремния, и какой его температурный режим?
6. Какие металлы используются в виде подложки в установках для получения поликристаллического кремния?
7. Какие методы перекристаллизации используются для очистки полупроводниковых материалов?
8. В чём заключается сущность зонной плавки?
9. Какое отличие метода выращивания кристаллов по Чохральскому от других известных методов Вы можете назвать?
10. Значение и расчёт коэффициента сегрегации (или распределения) примеси.
11. Как по равновесным коэффициентам распределения примесей в кремнии можно определить, какие элементы методом направленной кристаллизации удаляются неэффективно?

Критерии оценивания.

Текущий контроль считается пройденным при правильных ответах на вопросы более 50%.

6.1.2 семестр 3 | Реферат

Описание процедуры.

После самостоятельного изучения рекомендуемой литературы на последней неделе семестра обучающийся должен предоставить преподавателю отчетный документ по данному виду СРС в виде реферата (текст реферата должен быть выполнен на ПК, на листах белой бумаги формата А4). Допускается сдача в электронном виде.

Примерная тематика рефератов

1. Виды кремнеземсодержащего сырья, пригодного для производства кристаллического кремния.
2. Новые перспективные виды углеродистых восстановителей для выплавки кремния.
3. Подготовка шихтовых материалов к плавке.
4. Развитие конструкций электропечей для выплавки кремния.
5. Продукты руднотермической плавки, основные характеристики.
6. Новые технологические решения при производстве и рафинировании металлургического кремния.
7. Программный комплекс «Селектор» как эффективный метод изучения карботермического процесса получения кремния.
8. Виды рафинирования технического кремния.
9. Новые методы рафинирования кремния: достоинства и недостатки.
10. Обзор методов термодинамического моделирования применяемых при производстве кремния.
11. Применение особоочищенного кремния.
12. Основные свойства полупроводникового кремния, влияние дефектов и примесей.
13. Конструкция оборудования для выращивания моно- и мульткристаллического кремния.
14. Способы получения кремния полупроводникового качества.
15. Поиск новых решений использования техногенных отходов при производстве кремния.
16. Расширение сырьевой базы для производства металлургического кремния.

Критерии оценивания.

- глубокая теоретическая проработка исследуемых проблем на основе анализа изученных источников;
- всестороннее использование статистических и других необходимых аналитических данных и сведений, характеризующих рассматриваемые процессы;
- умелая систематизация изучаемого материала, обобщению и выделению главного;
- аналитический и критический подход к изучаемым фактам в интересах проблемы, поставленной в работе;
- аргументированность выводов, обоснованности предложений и рекомендаций;
- логичность, последовательность и самостоятельность изложения решаемой проблемы.

6.2 Оценочные средства для проведения промежуточной аттестации

6.2.1 Критерии и средства (методы) оценивания индикаторов достижения компетенции в рамках промежуточной аттестации

Индикатор достижения компетенции	Критерии оценивания	Средства (методы) оценивания
----------------------------------	---------------------	------------------------------

		промежуточной аттестации
ПК-4.3	Демонстрирует способность разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния	Устное собеседование по вопросам экзаменационного билета
ПК-8.3	Демонстрирует знания принципов рационального природопользования и умения их применять для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния	Устное собеседование по вопросам экзаменационного билета

6.2.2 Типовые оценочные средства промежуточной аттестации

6.2.2.1 Семестр 3, Типовые оценочные средства для проведения экзамена по дисциплине

6.2.2.1.1 Описание процедуры

Для проведения экзамена предусмотрены экзаменационные билеты, каждый из которого включает 2 задания: 1 – ответ на теоретический вопрос (в виде теста); 2 - предложение решения проблемной ситуации в металлургическом производстве.

Типовые вопросы к экзамену:

1. Какие печи используются при получении кремния?
2. Как влияет реакционная способность углеродистого восстановителя на извлечение кремния
3. Какой метод используется для восстановления кремния из его соединений?
4. В качестве окислителя при окислительное рафинировании кремния применяют
5. Какой узел печи отвечает за выливку кремния
6. Расположите химические реакции в порядке их протекания в печи
7. Расположите примеси в порядке эффективности их удаления при окислительном рафинировании (от наиболее эффективного к менее)
8. Дополните основную реакцию выплавки кремния: _____ + 2C = Si + 2CO
9. Соотнесите температуры с процессами (областями) получения кремния
10. Соотнесите продукт с процессом производства кремния
11. Какое содержание SiO₂ должно быть в рудном сырье для производства технического кремния?
12. Какую температуру (°C) имеют реакционные газы при выходе из колошника?
13. Основной компонент шлака производства кремния
14. Продукт газоочистки производства кремния
15. Что влияет на извлечение кремния в продукт?
16. Расположите области применения кремния по требованию к его качеству от низких требований к высоким
17. Распределите исходные и конечные материалы (продукты) руднотермической плавки:
18. Что является основным кремнеземсодержащим сырьем для промышленного получения кремния?
19. Какая примесь не удаляется при окислительное рафинировании кремния?

Примеры эссе или разбора конкретных ситуаций:

1. Какие технологические нарушения могут возникнуть при рудовосстановительной

плавки?

2. Предложите возможное использование пыли газоочистки производства кремния, содержание SiO₂ 99 %
3. По данным о содержании элементов предложить способ рафинирования трех видов кремния: 1) Si – 97,0, Fe – 1,0, Al – 1,2, Ca – 0,8; 2) Si – 99,999, Fe – 0,0008, Al – 0,00007, Ca – 0,00004; 3) Si – 99,5, Fe – 0,4, Al – 0,09, Ca – 0,01
4. На предприятие по производству технического кремния поступили пробы кварцита 2-х месторождений (КВ-1 и КВ-2). Данные анализа химического состава образцов по содержанию оксида железа следующие, масс. %: КВ-1 - 0,10; КВ-2 - 0,26 - Fe₂O₃. Какой из 2-х рудных материалов можно рекомендовать для выплавки технического кремния?
5. Какие требования предъявляются к углеродистым восстановителям?
6. Получаемый металлургический кремний содержит большое количество примесей. Что может быть основной причиной этой проблемы?
7. Компания рассматривает возможность использования нового типа сырья для производства металлургического кремния. Какие факторы следует учитывать при оценке качества кварца?
8. Компания рассматривает возможность использования нового типа печи для производства металлургического кремния. Какие факторы следует учитывать при оценке конструкции печи?
9. Какие методы моделирования применяют для исследования процессов производства кремния?
10. Способы переработки мелкодисперсных отходов кремниевого производства.

6.2.2.1.2 Критерии оценивания

Отлично	Хорошо	Удовлетворительн о	Неудовлетворительно
Демонстрирует способность разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния. Демонстрирует знания принципов природопользования и умения их применять для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния.	Демонстрирует способность разрабатывать некоторые предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния. Демонстрирует, но не в полной мере, знания принципов природопользования и умения их применять для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии	Демонстрирует слабую способность разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния. Слабо демонстрирует знания принципов природопользования и умения их применять для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния.	Не демонстрирует способность разрабатывать предложения по совершенствованию технологических процессов в области производства кремния. Не демонстрирует знания принципов рационального природопользования и умения их применять для энерго- и ресурсосбережения технологических процессов в металлургии кремния.

7 Основная учебная литература

1. Немчинова Н. В. Кремний: свойства, получение, применение : учебное пособие / Н. В. Немчинова, В. Э. Клец, 2008. - 271.
2. Немчинова Н. В. Физикохимия и карботермия кремния : учебное пособие при подготовке бакалавров по направлению 22.03.02 "Металлургия" / Н. В. Немчинова, 2017. - 287.

8 Дополнительная учебная литература и справочная

1. Катков О. М. Выплавка технического кремния : учебное пособие / О. М. Катков, 1999. - 243.
2. Технология полупроводникового кремния / Э. С. Фалькевич, Э. О. Пульнер, И. Ф. Червоный и др., 1992. - 406.
3. Теория и практика восстановительной электроплавки кремния / Б. И. Зельберг [и др.], 2001. - 450.
4. Бельский С. С. Совершенствование процессов рафинирования при карботермическом получении кремния высокой частоты : диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.02 / Бельский Сергей Сергеевич, 2009. - 172.
5. Немчинова Н. В. Развитие теории и практики получения кремния высокой чистоты карботермическим способом : диссертация ... доктора технических наук: 05.16.02 / Немчинова Нина Владимировна, 2010. - 364.
6. Немчинова Н. В. Термодинамическое моделирование при изучении карботермического процесса получения кремния : монография [для направления 150400 "Металлургия" и научной специальности 05.16.02 "Металлургия черных, цветных и редких металлов"] / Н. В. Немчинова, 2013. - 99.
7. Тютрин А. А. Разработка кислотно-ультразвукового рафинирования кремния при карботермической технологии : диссертация... кандидата технических наук: 05.16.02 / Тютрин Андрей Александрович, 2013. - 179.
8. Немчинова Н. В. Кислотно-ультразвуковое рафинирование кремния : монография / Н. В. Немчинова, А. А. Тютрин, 2017. - 160.
9. Леонова М. С. Разработка технологии подготовки шихты из техногенного сырья для производства кремния : диссертация ... кандидата технических наук: 05.16.02 / Леонова Мария Сергеевна, 2017. - 201 л.
10. Тютрин А. А. Окомкование шихты из техногенного сырья для производства кремния : монография / А. А. Тютрин, 2020. - 172.
11. Пат. 2703084, Российская Федерация, С01В33/00. Способ получения технического кремния / Н.В. Немчинова, А.А. Тютрин, С.С. Бельский; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИРНИТУ». – № 2019120208, заявл. 28.06.2019; опубл. 15.10.2019 Бюл. № 29.

12. Новые направления в металлургии кремния : методические указания для самостоятельной работы студентов / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2016. - 16.

13. Новые направления в металлургии кремния [Электронный ресурс] : методические указания по выполнению практических работ по направлению подготовки 22.04.02 "Металлургия" (уровень магистратуры) / Иркут. нац. исслед. техн. ун-т, 2018. - 21.

9 Ресурсы сети Интернет

1. <http://library.istu.edu/>
2. <https://e.lanbook.com/>

10 Профессиональные базы данных

1. <http://new.fips.ru/>
2. <http://www1.fips.ru/>

11 Перечень информационных технологий, лицензионных и свободно распространяемых специализированных программных средств, информационных справочных систем

1. Microsoft Windows Seven Professional (Microsoft Windows Seven Starter) - Seven, Vista, XP_prof_64, XP_prof_32 - поставка 2010
2. Microsoft Office 2007 VLK (поставки 2007 и 2008)
3. Свободно распространяемое программное обеспечение Свидетельство № 2024663922, Российская Федерация, Программа для расчета распределения бора между кремнием и шлаком в восстановительных условиях / А.А. Ильин, Н.В. Немчинова, Н.Н. Зобнин, И.А. Пикалова, А.А. Тютрин, Г.А. Ломтиков; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «ИрНИТУ». № заявки 2024662136, заявл. 30.05.2024; опубл. 14.06.2024.

12 Материально-техническое обеспечение дисциплины

1. Экран на штативе ScreenMedia Apollo-T
2. Проектор "Epson EB-S18"